

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 19920061151859

UDC \_\_\_\_\_

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

# 电纺纳米纤维运动学建模与仿真

Modeling and Simulation of Nanofibers Movement in  
Electrospinning

王红莲

指导教师姓名: 孙道恒教授

专 业 名 称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2009 年 5 月

论文答辩时间: 2009 年 6 月

学位授予日期: 2009 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2009 年 5 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月        日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 摘 要

静电纺丝技术简单、制造成本低、电纺丝纳米纤维性能优越，在柔性电子、生物医学和 MEMS 等领域受到了广泛的关注。由于电纺丝过程的不稳定和影响因素的不确定性，如何实现静电纺丝纳米纤维的可控沉积一直是静电纺丝技术应用研究的难题和关键。

本文针对电纺丝过程纳米纤维空间运动和沉积规律展开研究。讨论了收集板上已沉积纳米纤维对后续运动纤维的力学关系，通过数学建模仿真了纳米纤维的空间运动和沉积过程。

首先，建立刚性纳米纤维运动学模型进行纳米纤维运动仿真。刚性纳米纤维与收集板接触之前，纤维运动包含了平动和转动两个部分；当刚性纤维接触到收集板后，纤维运动只存在转动的运动形式，这两种运动形式共同构成了静电纺丝过程射流/纤维的螺旋和鞭动过程。

进行纳米纤维运动学分析，讨论了各工艺参数的影响权重。结果表明施加电压和电极间距是纳米纤维运动的主要影响因素。随着电极间距的减小，刚性纳米纤维运动距离将随之迅速减小，通过减小电极间距有利于实现纤维的可控沉积，与近场静电纺丝原理相符。

基于 Maxwell 粘弹性力学理论建立了柔性纳米纤维运动学仿真模型，分析了柔性纳米纤维的空间运动状态和沉积规律。讨论了纤维运动中螺旋与鞭动状态与电极间距的关系，当电极间距小于 3mm 时，纤维运动过程中螺旋与鞭动将明显减少，有利于获得有序纳米纤维；收集板导电率越小，已沉积纤维电荷导走速度越小，已沉积纤维的电荷排斥力对后续纳米纤维沉积过程的影响增强，较难以获得有序纳米纤维；聚合物溶液浓度增大，纳米纤维分布将变得更加密集有序。开展近场静电纺丝实验研究，验证了柔性纳米纤维仿真模型的准确性。

通过静电纺丝纳米纤维的运动学仿真分析，讨论了静电纺丝纳米纤维空间运动状态和沉积规律，进一步加深了近场静电纺丝技术的理解，为以后的应用研究提供了较好的理论基础。

**关键词：**静电纺丝；纳米纤维；运动学仿真

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

Electrospinning is a novel, simple and low cost technique to fabricate nanofiber with outstanding performance, which has attracted lots of attention in the fields of flexible electron, biomedicine and MEMS. How to control the deposition of nanofibers are always the key for the applications of electrospinning, since the process of electrospun is unstable and the factors uncertainty.

This paper focuses on the research of the movement and deposition of electrospinning nanofibers. The mechanics relationship between the deposited nanofiber and the moving nanofiber is discussed. A mathematical Model is built up to simulate the process of nanofibers movement and deposition during the electrospinning.

Firstly, kinematic model is built up to simulate the movement of rigidity nanofibers. Translation and rotation were included in the movement of nanofibers before rigidity nanofibers contacting the collector. Then, there was only rotation in the nanofibers after that contact the collector. So the helical whipping of jet/nanofibers formed by the combination of translation and rotation of electrospinning.

The kinematic analysis of electrospinning nanofiber was done, and the influence factors of process parameters were discussed. Results show that the applied voltage and distance between spinneret and the collector are the main influencing factor in the nanofiber movement. With the distance between spinneret and collector decreasing, the projection distance of nanofiber movement diminished greatly. So the controllable deposition of nanofibers can be realized by decreasing the distance between spinneret and collector, corresponding with the principle of Near-Field Electrospinning (NFES).

Kinematic model of the flexible nanofiber was built based on Maxwell viscoelastic theory, and the process of nanofiber motion and deposition was analysed. The relationship between helical whipping and electrodes distance had been discussed. Ordered nanofibers can be obtained easily when the electrodes distance was less than 3mm, the radius of helix of nanofibers in electrospinning reduced greatly and the whipping diminished quickly. The repulsive force of charge applied on the moving nanofiber on the deposited nanofiber increases with the resistivity of collector, for less charge on the deposited nanofiber were transported through the collector. It is difficult to obtain ordered nanofiber on the collector with higher resistivity. The viscoelastic

force of nanofibers increases with the concentration of polymer solution, and denser and more orderly nanofiber would be obtained. NFES experiment was done to check the kinematic model of nanofiber.

Kinematic simulation of electrospinning nanofibers was done to research the process of nanofiber movement and deposition. This work has put forward the theory research and provided a good foundation for the application of NFES technique.

**Keywords:** Electrospinning; Nanofibers; Kinematic Simulation



目 录	
摘 要 .....	I
Abstract .....	III
第一章 前 言 .....	1
1.1 静电纺丝技术 .....	1
1.2 电纺纳米纤维的应用 .....	2
1.3 电纺纳米纤维可控沉积 .....	4
1.4 本研究课题的提出 .....	5
1.5 研究目标以及主要工作 .....	6
1.5.1 研究目标 .....	6
1.5.2 主要工作 .....	6
第二章 基于刚体动力学的纳米纤维运动建模 .....	8
2.1 电纺成型过程分析 .....	8
2.2 电纺纳米纤维运动学建模 .....	9
2.2.1 纤维下落过程数学建模 .....	11
2.2.2 纤维沉积过程数学建模 .....	16
2.3 本章小结 .....	19
第三章 刚性纳米纤维运动学仿真 .....	20
3.1 模型求解 .....	20
3.2 纳米纤维空间运动状态 .....	21
3.2.1 纳米纤维下落过程运动状态 .....	22
3.2.2 纳米纤维沉积过程运动状态 .....	24
3.3 纤维运动阶段运动学分析 .....	24
3.3.1 纳米纤维下降过程的速度分析 .....	25
3.3.2 纳米纤维下落过程角速度分析 .....	26

3.3.3 纤维在沉积过程中角速度分析 .....	28
<b>3.4 纳米纤维沉积位置 .....</b>	<b>30</b>
3.4.1 施加电压的影响 .....	30
3.4.2 电极间距的影响 .....	31
3.4.3 纳米纤维初始角度的影响 .....	32
3.4.4 纳米纤维质心初始位置的影响 .....	34
<b>3.5 本章小结 .....</b>	<b>35</b>
<b>第四章 电纺参数对纳米纤维的影响分析 .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1 施加电压影响分析 .....</b>	<b>36</b>
4.1.1 纳米纤维沉积速度与施加电压的关系 .....	37
4.1.2 纳米纤维沉积角速度与施加电压的关系 .....	38
4.1.3 纤维运动距离与施加电压的关系 .....	40
<b>4.2 电极间距影响分析 .....</b>	<b>42</b>
4.2.1 纳米纤维沉积速度与电极间距的关系 .....	42
4.2.2 纳米纤维沉积角速度与电极间距的关系 .....	44
4.2.3 纤维运动距离与电极间距的关系 .....	46
<b>4.3 纤维的初始位置影响分析 .....</b>	<b>47</b>
4.3.1 初始角度影响分析 .....	47
4.3.2 纤维质心初始位置 .....	53
<b>4.4 电纺参数影响的权重比分析 .....</b>	<b>60</b>
4.4.1 正交试验法 .....	60
4.4.2 静电纺丝过程参数影响分析 .....	61
<b>4.5 本章小结 .....</b>	<b>63</b>
<b>第五章 柔性纳米纤维运动学仿真 .....</b>	<b>64</b>
<b>5.1 柔性纳米纤维运动的数学建模 .....</b>	<b>64</b>
5.1.1 静电纺丝拉伸模型 .....	64
5.1.2 柔性纳米纤维受力分析 .....	65
5.1.3 带电纤维的三维动力学方程 .....	68

5.2 柔性纳米纤维运动的仿真结果 .....	68
5.2.1 模型求解 .....	69
5.2.2 参数确定 .....	69
5.2.3 空间运动状态 .....	70
5.2.4 沉积位置状态 .....	71
5.2.5 纤维沉积速度 .....	74
5.3 近场静电纺丝实验 .....	75
5.4 本章小结 .....	77
第六章 结论与展望 .....	79
6.1 结论 .....	79
6.2 工作展望 .....	80
参考文献 .....	81
致 谢 .....	86
攻读硕士学位期间的科研成果 .....	87

## Table of Contents

<b>Abstract.....</b>	<b>III</b>
<b>Chapter 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 Technology of Electrospinning .....	1
1.2 The Application of Nanofibers in Electrospinning.....	2
1.3 Research on Controllable Deposition in Electrospinning.....	4
1.4 The Problems of Electrospinning.....	5
1.5 Target and Main Works .....	6
1.5.1 Target of the Research .....	6
1.5.2 Main Works .....	6
<b>Chapter 2 Model of the Movement of Rigidity Nanofibers in Electrospinning Based on Dynamics of Rigid Bodies.....</b>	<b>8</b>
2.1 Analyse the Process of Electrospinning .....	8
2.2 Modeling the Movement of Rigidity Nanofibers .....	9
2.2.1 Model the Process of the Sinking Movement.....	11
2.2.2 Model the Process of the deposition.....	16
2.3 Summary .....	19
<b>Chapter 3 Simulation of Movement of the Rigidity Nanofiber .....</b>	<b>20</b>
3.1 Model Solving .....	20
3.2 The Path of Nanofiber.....	21
3.2.1 Path of the Nanofiber during Sinking.....	22
3.2.2 Path of the Nanofiber during Deposition.....	24
3.3 Kinematic Analysis the Process of the Nanofiber.....	24
3.3.1 Analyse Velocity of the Nanofiber during Sinking.....	25
3.3.2 Analyse Rotational Velocity of the Nanofiber during Sinking.....	26
3.3.3 Analyse Rotational Velocity of the Nanofiber during Deposition.....	28
3.4 The Deposited Position of Nanofibers .....	30
3.4.1 The Effect of Applied Voltage .....	30
3.4.2 The Effect of Distance between Sprayer and Collector.....	31

3.4.3 The Effect of Initial Angle of the Nanofiber .....	32
3.4.4 The Effect of Initial Position of Mass Center of the Nanofiber .....	34
<b>3.5 Summary .....</b>	<b>35</b>
<b>Chapter 4 Analyse the Influence of Electrospun Parameters.....</b>	<b>36</b>
<b>4.1 Analyse the Effect of Applied Voltage.....</b>	<b>36</b>
4.1.1 The Relationship between Deposition Velocity and Applied Voltage ..	37
4.1.2 The Relationship between Deposition Rotational Velocity and Applied Voltage .....	38
4.1.3 The Relationship between Distance of the Nanofiber and Applied Voltage .....	40
<b>4.2 Analyse the Effect of Sprayer-to-Collector Distance.....</b>	<b>42</b>
4.2.1 Relationship between Deposition Velocity and Sprayer-to-Collector Distance .....	42
4.2.2 Relationship between Deposition Rotational Velocity and Sprayer-to-Collector Distance .....	44
4.2.3 Relationship between Distance of the Nanofiber and Sprayer-to-Collector Distance .....	46
<b>4.3 Analyse the Effect of Initial Position of the Nanofiber .....</b>	<b>47</b>
4.3.1 Analyse the Effect of Initial Angle of the Nanofiber.....	47
4.3.2 Analyse the Effect of Initial Position of Mass Center of the Nanofiber	53
<b>4.4 Analyse the Weight Influence of Parameters in Electrospinning.....</b>	<b>60</b>
4.4.1 Orthogonal Testing Method.....	60
4.4.2 Analyse the Influence of Parameters in Electrospinning.....	61
<b>4.5 Summary .....</b>	<b>63</b>
<b>Chapter 5 Simulation the Movement of Flexible Nanofibers in Electrospinning.....</b>	<b>64</b>
<b>5.1 Mathematic Model of the Movement of Flexible Nanofibers.....</b>	<b>64</b>
5.1.1 The Tension Model of Electrospinning .....	64
5.1.2 Stress Analysis of Flexible Nanofibers.....	64
5.1.3 Three-dimensional Dynamcis Equations of Charged Nanofibers .....	68
<b>5.2 Result of Simulation for Flexible Nanofibers.....</b>	<b>68</b>
5.2.1 Model Solving .....	69

5.2.2. Confirm the Parameters .....	69
5.2.3 The Path of the Nanofiber .....	70
5.2.4 The Position of the Nanofiber on Collector.....	71
5.2.5 Deposition Velocity of the Nanofibe .....	74
<b>5.3 NFES Experiment .....</b>	<b>75</b>
<b>5.4 Summary .....</b>	<b>77</b>
<b>Chapter 6 Conclusions and Future Works .....</b>	<b>79</b>
6.1 Conclusions .....	79
6.2 Future Works .....	80
<b>References .....</b>	<b>81</b>
<b>Acknowledgements.....</b>	<b>86</b>
<b>Publications .....</b>	<b>87</b>

## 第一章 前言

### 1.1 静电纺丝技术

静电纺丝技术是A Formhals<sup>[1]</sup>在 1934 年提出的一种制备连续纳米纤维材料的方法，之后很长一段时间静电纺丝技术并没有引起特别的关注；直到 20 世纪 80 年代纳米技术的兴起发展，静电纺丝以其独特的优势，如纯物理过程、简单易操作、成本低廉等<sup>[2-4]</sup>，才重新引起人们的关注，并成为了目前纳米制造技术发展的一大研究热点，并在多个应用领域取得快速的发展<sup>[5]</sup>。

静电纺丝原理如图 1-1 所示，静电纺丝过程通过在喷头与收集板之间施加高压静电，聚合物溶液在高压静电力的作用下被拉伸成圆锥状，即泰勒锥(Taylor Cone)<sup>[6-10]</sup>；当电场力超过了某一临界值时，聚合物溶液克服本身的粘滞力和表面张力而形成喷射细流；射流从针尖处喷出后，射流在电场的作用下快速向收集板的方向加速。在加速的初始阶段，由于表面张力和自身的粘滞力远远大于电场力的作用，所以射流不断地延长并保持直线轨迹。射流经过一段距离的直线运动后将发生力学松弛<sup>[11-15]</sup>。发生力学松弛的射流的长度与外加电场的大小成正比。而一旦发生力学松弛，射流带电荷的不同部分尤其是表面的电荷相互作用将导致射流的不稳定，使射流发生分裂或非直线的螺旋运动，这是静电纺丝的弯曲不稳定现象（Bending Instability），随着溶剂挥发，射流运动形成连续的纳米纤维沉积在收集板上<sup>[16-20]</sup>，如图 1-2 所示。

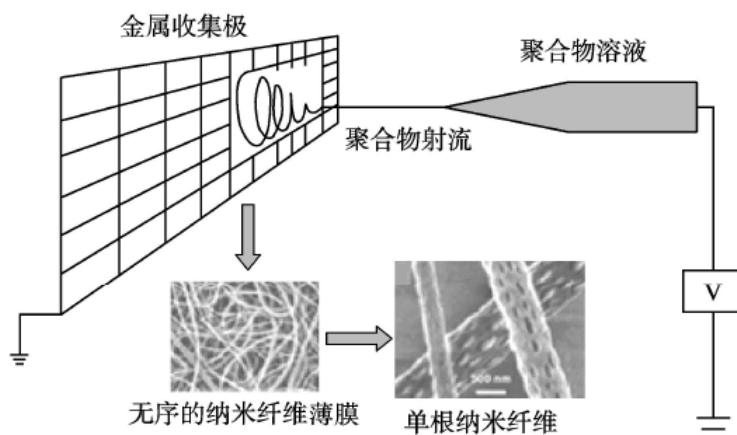


图 1-1 静电纺丝原理图

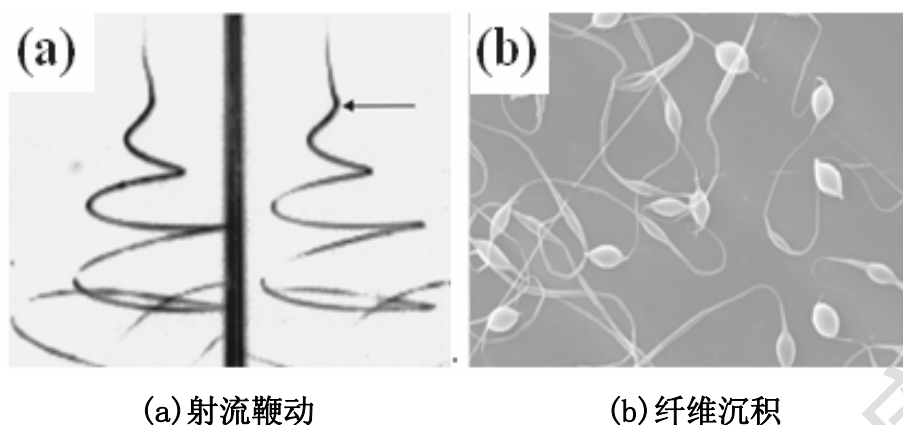


图1-2 静电纺丝运动和沉积过程

## 1.2 电纺纳米纤维的应用

电纺纳米纤维直径范围比传统纺织纤维的直径范围小，这种纳米纤维具有良好的光学、电学、电磁学等方面的性质，因而在电子光学、生物医药、微纳米器件等领域具有潜在的应用价值<sup>[21-25]</sup>。

静电纺丝法制得的PLA、PGA、PLGA等纳米纤维有很好的生物相容性，可以直接沉积在设计好的准备植入身体组织修复器件上，这样的多孔纤维可以提高身体本身的组织和修复器件之间的硬度匹配性能<sup>[26]</sup>（如图1-3 (a)所示）。

纳米纤维薄膜对药物不仅有缓释作用，可有效防止术后的粘连，而且对药物几乎没有影响。E.R. Kenawy<sup>[27]</sup>将盐酸四环素分别加入到聚合物溶液的混合液中，然后采用静电纺丝法制备混合纤维并测试了性能。如图1-3 (b)所示，在电场的辅助下，可将经消毒的EVOH（乙烯-乙烯醇共聚物）用静电纺丝法直接沉积到皮肤的损伤组织处，形成修复性无纺纤维膜<sup>[28]</sup>。修复用电纺纳米纤维的孔径通常为500nm至1 $\mu$ m，该孔径足以阻挡细菌和灰尘对创伤的感染。Reneker<sup>[29]</sup>研究了细胞在纳米纤维上的生长，可直接用于皮肤的烧伤和治疗创伤。



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库